

LT-GaAs 飞秒光电导之电场响应特性^{*}

邓 莉 刘叶新 寿 倩 吴添洪 赖天树 文锦辉 林位株[†]

(中山大学光电子材料与技术国家重点实验室/物理系, 广州 510275)

(2003 年 11 月 27 日收到 2004 年 1 月 9 日收到修改稿)

利用飞秒光电导自相关技术研究了 LT-GaAs 飞秒光电导开关时间随外加偏置电场的变化规律. 实验结果显示当外加偏置电场从 0.5×10^4 V/cm 上升到 9.5×10^4 V/cm 时, 光电导开关时间开始在 200fs 附近缓慢变化再迅速增加到 750fs. 这是由于随着外加电场增加, Frenkel-Poole 效应导致的 EL2 缺陷中心库仑吸引势垒降低和电场增强的碰撞电离效应显著增强, 导致载流子俘获截面减小, 载流子寿命增加之故.

关键词: 光电导自相关技术, 载流子俘获时间, Frenkel-Poole 效应, 电子碰撞电离效应

PACC: 4262, 4283

1. 引 言

光电导开关的响应特性在超快电信号的产生和探测以及宽带集成电路和器件的性能测试中具有重要意义. 对于光电导开关在电场作用下的响应特性的物理规律和机理已有若干报道, 但结论各不一致^[1-5]. Stuart 等人利用掺 O^+ 的 Si 材料做的光电导开关进行光电导自相关测量, 发现在外加偏置电场从 0.2×10^4 V/cm 到 2.0×10^4 V/cm 的变化范围内, 光电导开关时间保持不变^[1]. Zamdmer 等人则认为加较大偏置电场时, LT-GaAs 光电导开关时间将随之增加^[2].

本文对 LT-GaAs 飞秒光电导开关在电场作用下的响应特性和机理进行了较详细的研究, 并且利用飞秒光电导自相关技术测量了 LT-GaAs 共面传输光电导开关的响应特性, 发现当外加偏置电场从 0.5×10^4 V/cm 到 2.0×10^4 V/cm, 光电导开关时间在 200fs 附近缓慢变化; 当外加电场由 2.0×10^4 V/cm 增加到 9.5×10^4 V/cm 时, 这一时间增加到 750fs. 根据多声子无辐射理论、Frenkel-Poole 效应和电场增强碰撞电离效应很好地解释了光电导开关时间随外加偏置电场的变化规律.

2. 光电导自相关技术及实验结果分析

图 1 为 LT-GaAs 光电导开关的构造图. LT-GaAs 光电导薄层采用分子束外延 (MBE) 技术, 在富含 As_4 , 200—350℃ 温度的条件下生长于本征 GaAs 衬底上, 并在 600℃ 温度下作退火处理. 在 LT-GaAs 薄层表面真空蒸镀金属层后, 再经光刻形成所需的共面波导型 LT-GaAs 飞秒光电导开关器件. 其中, 金属电极层材料为 0.1/0.2 μ m Cr/Au, 光电导开关缝隙宽

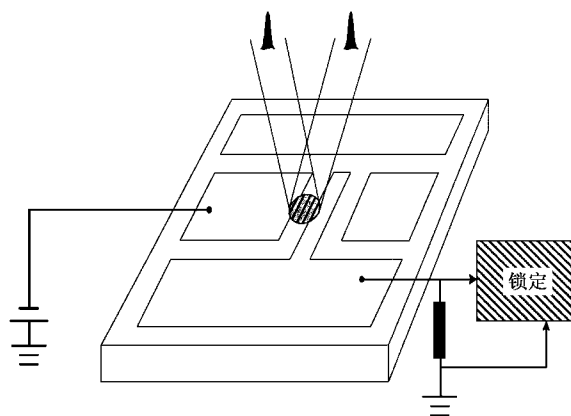


图 1 LT-GaAs 共面波导型光电导开关结构图 (电极间的平行线代表由于两平行偏振光脉冲相干形成的载流子密度光栅. 取样电阻为 10k Ω)

^{*} 国家自然科学基金 (批准号 60178020, 69888005) 及广东省自然科学基金 (批准号 011201, 2002B11601) 资助的课题.

[†] Email: stslwz@zsu.edu.cn; 电话和传真 020-84110042.

10 μm . 利用本实验室自行研制的 KLM 钛宝石激光器产生的中心波长为 775nm, 脉宽为 16fs, 重复率 100MHz 的飞秒激光脉冲分成两束^[6], 一束为抽运光, 一束为探测光, 其偏振方向平行, 强度比为 2:1, 经焦距为 50mm 的透镜聚焦为直径 13 μm 光斑, 激发 LT-GaAs 飞秒光电导开关. 用频率 1292Hz 和 1077Hz 分别对两束光进行斩波调制. 其和频信号经锁相放大器放大后, 由计算机采集. 图 2 所示的为外加场强分别为 1.0 $\times 10^4$ V/cm (点划线) 和 5.5 $\times 10^4$ V/cm (实线) 时测量到的光电流自相关信号. 这一信号实际上是负的光电流信号, 其中部是一个锐的尖峰, 两旁是较慢变化的旁瓣. 此尖峰的半高全宽和峰值位置与光脉冲的强度自相关曲线是一致的. 尖峰两边的旁瓣随时间成指数衰减, 其衰减时间常数表征 LT-GaAs 飞秒光电导的开关时间. 我们对光电导自相关信号的物理机理做如下解释: 当抽运光和探测光在时间、空间上完全重合时发生相干, 导致激发的载流子密度不均匀分布, 形成载流子密度光栅, 此光栅平行于电极排列, 其形成的空间电荷场屏蔽了外加电场的作用, 导致一个负的尖峰光电流信号. 实验验证当载流子密度光栅垂直于电极排列, 则无法观察到光电导自相关信号. 当抽运光与探测光脉冲不相重合时, 相干效应减弱但并不会立刻消失, EL2 缺陷中心俘获载流子加速了载流子密度光栅的消失, 光电流信号开始增加至直流光电导的情况. 因此, 负的尖峰脉冲反映了抽运与探测光脉冲的强度自相关情况, 而慢变的旁瓣则反映了光生载流子的衰变情况, 它与光电导开关时间密切相关. 考虑了载流子俘获和激光脉冲的相干效应, 总的归一化光电流自相关信号可以写为^[3]

$$G(\tau) = \delta \cdot \exp(-|\tau/\tau_c|) + (1 - \delta) \cdot \exp(-\tau^2/T_c^2), \quad (1)$$

δ 是比例系数, 不同的开关结构和测量条件下 δ 有不同取值. τ_c 是光电导开关时间, T_c 等于光脉冲强度自相关的半高全宽度. 将 δ, τ_c 作为拟合参数, 利用(1)式拟合光电导自相关曲线, 由图 2 实线可知, 当 δ 和 τ_c 的值分别等于 0.18 和 550fs 时, 实验曲线和理论曲线拟合得较好. 点划线对应于外加电场为 1.0 $\times 10^4$ V/cm 时的光电导自相关信号, 其开关时间明显小于外加电场为 5.5 $\times 10^4$ V/cm 时的情况. 当偏置电场为 0.5—2.0 $\times 10^4$ V/cm 时, 可测得光电导开关时间都在 200fs 附近缓慢变化, 这一结果与 Brorson 等人观察到的结果是一致的^[1]. 当外加电场

从 2.0 $\times 10^4$ V/cm 升到 9.5 $\times 10^4$ V/cm 时, LT-GaAs 飞秒光电导开关时间从 200fs 增加到 750fs. 图 3 中的实验数据点表示出了光电导开关时间随外加电场的变化情况. 有意思的是, 当外加电场保持在 2.0 $\times 10^4$ V/cm, 观察不同中心波长但强度相同的入射光激发电导开关, 其开关时间基本保持在 200fs, 此结果表明光电导开关时间与电子过超能量无关.

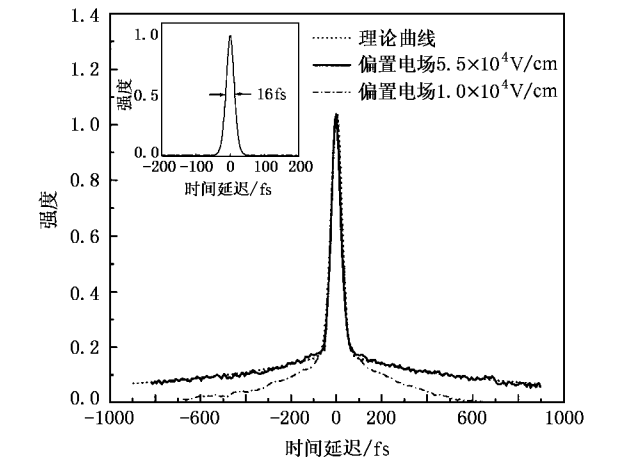


图2 在外场强分别为 5.5 $\times 10^4$ V/cm (实线) 和 1.0 $\times 10^4$ V/cm (点划线) 时光电流自相关信号 (内插图为脉宽为 16fs 的激光脉冲的强度自相关信号. 点线为 (1) 式的理论拟合信号, 此时取 $\delta = 0.18, \tau_c = 550\text{fs}$)

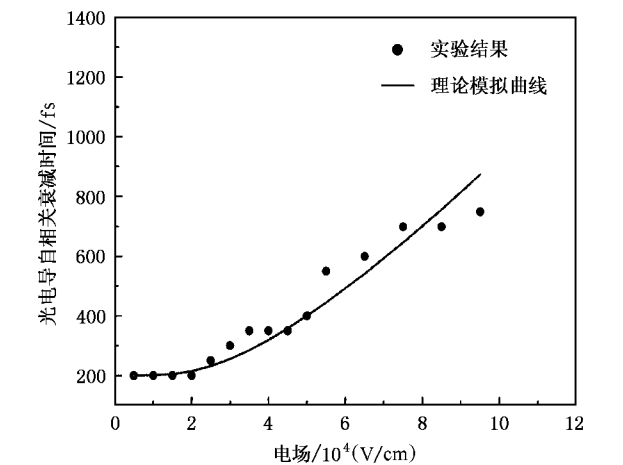


图3 LT-GaAs 光电导自相关信号衰减时间随外加偏振电场的变化情况 (●表示测量得到的 LT-GaAs 光电导的开关时间, 实线为用 (6) 式的拟合曲线)

3. 理论分析

LT-GaAs 光电导的开关特性, 是由光生载流子

的衰变情况,即载流子的寿命决定的.在 LT-GaAs 中,由富余的 As 原子形成反位 As_{Ga} 离子和 As 团沉淀产生的深缺陷能级 EL2 对光生载流子的俘获,导致载流子寿命缩短^[7].因此,它是决定光电导开关特性的主要因素.在一定的脉冲入射强度和电极结构条件下,载流子俘获时间 τ_c 定义为^[8]

$$\frac{1}{\tau_c} = N\sigma v, \quad (2)$$

其中 N 是载流子密度, σ 是载流子俘获截面, v 是热运动平均速率. 电场在以下三个方面影响俘获截面. 第一, 电场使 EL2 缺陷俘获中心的库仑吸引势垒降低 (Frenkel-Poole 效应), 因此会改变俘获截面. 第二, 电场的增强使碰撞电离效应增强, 从而影响俘获速率. 第三, 电场使载流子加热, 改变其能量分布从而影响俘获截面. 上述不同电子过超能量的实验结果说明后者并没有对光电导开关特性产生影响. 我们根据上述的前两种效应建立一个理论模型, 对 LT-GaAs 飞秒光电导开关时间随外加偏置电场的变化规律作出统一的解释.

外加电场可以导致材料中缺陷中心势垒的降低, 即所谓的 Frenkel-Poole 效应. 假定缺陷中心一次就将电子俘获, 电子进入势垒最顶端之下 $2k_B T$ 处的能态. 俘获截面正比于由临界半径 $r(E)$ 所包围的体积^[9,10]

$$\sigma = \int_{s(r,z,\theta)} r(E) dr dz d\theta, \quad (3)$$

其中 $r(E) = \left\{ \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{Ze^2} [2k_B T + \Delta\phi - eEz] - z^2 \right\}^{1/2}$, $\Delta\phi = \left(\frac{Ze^3 E}{\pi\epsilon\epsilon_0} \right)^{1/2}$ ^[11]. 将 (3) 式积分, 可得到电场为 E 时的俘获截面

$$\begin{aligned} \sigma(E) = \frac{6}{\eta^2(\eta+1)} & \left\{ \frac{1}{1 + [1 - \eta^2/(1+\eta)^2]^{1/2}} \right. \\ & - \frac{1}{1 + [1 + \eta^2/(1+\eta)^2]^{1/2}} \left. \right\} \\ & - \frac{2(\eta+1)^3}{\eta^6} \left\{ \{1 - [1 - \eta^2/(1+\eta)^2]^{1/2}\}^3 \right. \\ & - \left. \{1 - [1 + \eta^2/(1+\eta)^2]^{1/2}\}^3 \right\} \sigma(0), \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $\eta = \frac{\Delta\phi}{2k_B T}$, $\sigma(0)$ 为无外加电场时的俘获截面. 在低电场情况下, $\eta \ll 1$, 由 (4) 式可得 $\sigma(E)/\sigma(0) = 1$. 当外加电场较高时, $\eta \gg 1$, 可以看出 $\sigma(E)/\sigma(0)$ 以 $E^{-3/2}$ 变化.

在强电场中电子碰撞电离的平均概率与电子从

电场中获得的能量等于电离能阈值 U_0 的概率成正比. 这里考虑载流子能量的增加是由电子在外加电场中的加速或与声子碰撞能量发生了转移引起的. 鉴于上述观点, 考虑两种极端的情况: 第一, 电子从电场中获得能量 U_0 而未经历过一次碰撞; 第二, 电子可以通过与声子多次碰撞逐渐获得能量 U_0 . 第二种可能性比较小, 在这里采用第一种情况下的碰撞电离概率 w_i , 它正比于电子走过距离 $L = U_0/(eE)$ 发生碰撞的概率, 即^[12]

$$w_i \propto \exp\left(-\frac{U_0}{eE\lambda}\right), \quad (5)$$

其中 λ 为电子的平均自由程.

综合考虑 Frenkel-Poole 势垒降低效应和场增强的碰撞电离效应对俘获截面的影响, 由 (2), (3), (4), (5) 式可以得到载流子俘获时间

$$\tau_c(E) \propto \tau_c(E=0) [\sigma(E)]^{-1} \exp\left(-\frac{U_0}{eE\lambda}\right). \quad (6)$$

上式中的第一个因子是无电场作用下的载流子俘获时间, 可由多声子无辐射俘获时间计算得到^[8], 第二个因子是由于外电场使库仑势垒降低俘获截面减小, 第三个因子是由于场增强的碰撞电离效应. 图 3 所示 LT-GaAs 光电导开关时间随外加电场的变化情况, 圆点为实验测量值, 实线为理论计算曲线. 由 (6) 式计算所得曲线 (实线) 与实验测量的光电导开关时间吻合. 由拟合结果发现, 当 $\eta \ll 1$, 即外加电场较小, $\sigma(E)/\sigma(0) = 1$, 电场相关的碰撞电离效应对载流子俘获时间的影响很小, 因此当电场从 0 变化到 $2.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 时, 其光电导开关时间基本保持在 200fs. 当外加偏置电场大于 $2.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 时, 光电导开关时间开始增加. 这一结果很好地解释了 LT-GaAs 光电导开关时间随外加电场的变化规律.

4. 结 论

我们利用飞秒光电导自相关技术测量了 LT-GaAs 共面传输飞秒光电导开关的响应特性, 观测到当电场从 $0.5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 至约 $2.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 时, 光电导开关时间基本保持 200fs 不变, 当外加电场从 $2.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 增加到 $9.5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 时, 衰减时间从 200fs 增加到 750fs. 理论分析表明 LT-GaAs 光电导开关时间主要决定于载流子俘获时间. 在外加电场小于 $2.0 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 时, 深能级 EL2 缺陷中心的多声子无辐射俘获起主要作用, 俘获速率不随外加电场而变. 外加电场较高时 Frenkel-Poole 效应导致 EL2 缺

陷中心的库仑吸引势垒降低,同时电场增强碰撞电离效应引起载流子俘获截面减小,因此载流子俘获速率随着外加电场的增强而减小,光电导开关时间增加.由(6)式所描述的理论模型计算曲线与实验测

量结果很好符合,对先前报道中有关外加电场对 LT-GaAs 飞秒光电导开关时间影响的不同结果给出了统一的解释,对进一步研究和应用光电导开关特性具有参考意义.

[1] Brorson S D, Zhang J and Keiding S R 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2385

[2] Zamdmer Z and Hu Q 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2313

[3] Lin W Z, Liu Z G, Liao R, Zhang H C, Guo B, Wen J H and Lai T S 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 557

[4] Merkelo H, McCreddie B D, Veatch M S and Zocher A G 1988 *Ted Spanos Ieee Journal of Quantum Electronics* **24** 245

[5] Verghese S, Zamdmer N and Hu Q 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 842

[6] Deng L *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1938(in Chinese) [邓 莉等 2003 *物理学报* **52** 1938]

[7] Warren A C *et al* 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1331

[8] Huang K 1981 *Progress In Physics* **1** 31

[9] Dussel G A and Boer K W 1970 *Phys. Status Solidi* **39** 375

[10] Ning N H 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 3203

[11] Hartke J L 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 4871

[12] Lebedev P N 1965 *Soviet Phys. JETP* **21** 1135

Response characteristic of femtosecond LT-GaAs photoconductive switches at different voltage bias *

Deng Li Liu Ye-Xin Shou Qian Wu Tian-Hong Lai Tian-Shu Wen Jin-Hui Lin Wei-Zhu

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

(Received 27 November 2003 ; revised manuscript received 9 January 2004)

Abstract

The response characteristic of a LT-GaAs photoconductive switch formed in a coplanar waveguide at different voltage bias is studied with photocurrent autocorrelation measurement technique. The experimental results show that the switching time increases from ~ 200fs to ~ 750fs, when the bias voltage ascends from 0.5×10^4 to 9.5×10^4 V/cm. This phenomenon is attributed to the increase of carrier capture time arising from the potential barrier lowering (Frenkel-Poole effect) and the field-enhanced thermal ionization.

Keywords : photocurrent autocorrelation technique, carrier capture time, Frenkel-Poole effect, field-enhanced thermal ionization
PACC : 4262, 4283

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60178020 and 69888005), and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 011201, 2002B11601).